

第四系覆盖区深部热液脉型矿体

综合地球物理方法定位预测

——内蒙古维拉斯托矿区北侧隐伏矿体勘查例析

孟银生^{1,2)}, 杨立强^{1)*}, 张瑞忠¹⁾, 刘瑞德²⁾, 林天亮²⁾, 王文国²⁾

1) 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

2) 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000

摘 要: 维拉斯托岩浆热液脉型铜多金属矿床位于大兴安岭成矿带南段西坡白音查干, 已探明矿石量 881.14 万吨, 平均品位 Cu: 0.79%、Zn: 4.29%、Ag: 65~85 g/t。矿体的产出严格受 NE 向断裂带控制, 总体走向 NE—NEE, 倾向北。维拉斯托矿区北侧第四系覆盖区域是否存在隐伏矿体是当前亟待解决的问题。维拉斯托矿区北侧第四系覆盖区成矿条件与主矿区类似, 本文应用重力、磁法、激电中梯和可控源音频大地电磁法对其进行了隐伏铜多金属矿体的探测和研究, 构建了覆盖区岩浆热液脉型隐伏矿体定位勘查流程。首先, 针对全区的重力方向导数异常圈出三个 NE-NNE 向的“条带状”重力方向导数高值带, 推测为 F₁、F₂ 和 F₃ 三条断裂; 同时, 在上述“条带状”重力方向导数高值带内, 利用磁场化极和上延圈出一“月牙形”高值异常带(含多个串珠状磁异常), 推测为含矿岩体; 对应“月牙形”串珠状高磁异常带, 运用激电中梯视充电率和视电阻率圈定 M1 和 M2 两个视电阻率低值、视充电率高值异常区域, 推测为矿化岩体; 在此基础上, 综合分析面积性地球物理探测研究成果, 在重力、磁场和激电异常区域进行可控源音频大地电磁法研究中发现 2 处反演电阻率低值异常点(均位于 NW 向和 NEE 向断裂交汇处), 推测为富含硫化物矿体引起, 据此圈定两处矿体, 且推测该区深部可能存在更大规模的隐伏矿体。依据本文研究成果, 预测维拉斯托矿区北侧覆盖区存在隐伏矿体。

关键词: 维拉斯托; 综合地球物理方法; 勘查模型; 热液脉型隐伏矿

中图分类号: P618.41; P622.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2016.06.09

Application of Integrated Geophysical Methods to the Prospecting for Concealed Hydrothermal Vein-type Orebodies beneath Quaternary Sediments: A Case Study of the Northern Area of the Weilasituo Copper Polymetallic Deposit

MENG Yin-sheng^{1,2)}, YANG Li-qiang^{1)*}, ZHANG Rui-zhong¹⁾,
LIU Rui-de²⁾, LIN Tian-liang²⁾, WANG Wen-guo²⁾

1) State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083;

2) Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, Hebei 065000

Abstract: The Weilasituo magmatic hydrothermal vein-type copper-polymetallic deposit, with proven reserves of 8.811 4 million tons, is located in the western part of the southern section of the Da Hinggan Mountains

本文由国家自然科学基金项目(编号: 41504063)、国家重大科学仪器设备开发专项(编号: B02011YQ05006011)、高等学校学科创新引智计划“111 计划”(编号: B07011)和中国地质调查局地质调查项目(编号: 1212011120202; 121201108000150003-02)联合资助。

收稿日期: 2016-05-30; 改回日期: 2016-06-30。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 孟银生, 男, 1981 年生。工程师, 博士。主要从事固体矿产地球物理勘查研究。通讯地址: 065000, 河北省廊坊市广阳区金光道 84 号。电话: 0316-2267733。E-mail: josemeng@163.com。

*通讯作者: 杨立强, 男, 1971 年生。教授, 博士生导师。主要从事矿床学、矿产普查与勘探专业的科研与教学工作。通讯地址: 100083, 北京市海淀区学院路 29 号。电话: 010-82321937。E-mail: lqyang@cugb.edu.cn。

metalogenic belt. The average grade of Cu, Zn and Ag is 0.79%, 4.29% and 65~85 g/t, respectively. The NE-NEE-trending orebodies are strictly controlled by the NE-trending fault zones and dip northward. The existence or nonexistence of concealed orebody on the northern side of the Weilasituo ore district, which is covered by Quaternary cover, is an urgent problem to be solved. On the northern side of Weilasituo, the areas covered by the Quaternary sediments possess similar metallogenetic conditions to the main ore district. In order to investigate the concealed orebodies, the authors used integrated geophysical methods such as gravity method, magnetic method, induced polarization in median gradient array method and controlled source audio-frequency magnetotelluric method. Firstly, three NE-NNE trending ribbon-shaped negative residual density zones, which indicate the underlying faults F_1 , F_2 and F_3 , were detected based on directional derivative of gravity anomaly. In these zones, a crescent-shaped anomaly zone, with high values of magnetic reduction to pole and upward extension, was considered to be the target of ore hosting rocks, including multiple beaded magnetic anomaly. Then, two abnormal areas (M1 and M2) with lower apparent resistivity values and high apparent charging rates were recognized by apparent charging rate and apparent resistivity from induced polarization in median gradient array. These anomalies may be caused by ore-bearing rocks. Finally, controlled source audio-frequency magnetotelluric survey was applied to areas with anomalies of gravity value, magnetic value and induced polarization value, and two locations with low inversion resistivity were found. These may be caused by the sulfide-rich orebodies which are located at the intersection of NW- and NEE-trending faults. On the basis of these results, it is inferred that additional large-tonnage concealed orebodies are existent in the depth. Based on the results obtained, it is held that there exists a concealed orebody on the northern area of the Weilasituo ore district, which is covered by Quaternary sediments.

Key words: Weilasituo; integrated geophysical methods; exploration model; hydrothermal vein type of concealed orebody

覆盖区深部找矿面临探测深度大、干扰噪声强、精度要求高和深部成矿规律认识难的挑战,往往导致地质和地球化学信息获取存在困难(成秋明, 2012)。尤其是, 热液脉型矿体由于探测目标较小, 对其定位预测往往被视为覆盖区深部找矿的关键难题(郭灵俊等, 2011; Li et al., 2015; Yang et al., 2015a, b)。因此, 在覆盖区深部热液脉型隐伏矿体定位预测中, 亟需开展具有“透视”能力的综合地球物理方法、尤其是其勘查模型的研究(戚志鹏等, 2012; 王清义等, 2012; 徐启东等, 2012; Yang et al., 2013; 史建民等, 2014), 以期提高探查隐伏矿床(体)的有效性和推广应用性。

维拉斯托铜多金属矿床大地构造位于阿(尔泰山)—蒙(古)弧形构造带东段、锡林浩特复背斜中部、大兴安岭地区中生代岩浆岩带南偏西, 三级构造单元为米生庙复背斜轴部南东翼(图 1)(Zhao et al., 2007; Zhu et al., 2009; Zhu et al., 2009; 孙爱群等, 2011)。大兴安岭成矿带南段主脊和东坡矿床的赋矿围岩是火山-沉积地层(晚海西期和/或燕山期), 西坡矿床与之截然不同, 赋矿围岩是片麻岩(古生代)和石英闪长岩(海西期)(邵济安等, 2001; 刘建明等, 2004)。维拉斯托矿区及其北侧隐伏铜多金属矿床是大兴安岭成矿带南段西坡典型岩浆热液脉型矿床(杨岳清等, 2002; 毛景文等, 2013), 因此, 对其开展典型矿床解剖研究, 有助于深入认识大兴安岭西坡矿床赋存特征。

维拉斯托铜多金属矿床围岩为黑云斜长片麻

岩及花岗闪长岩, 矿体赋存于 NEE 向“S”型压扭性断裂构造中, 严格受构造控制, 为典型的岩浆热液矿床(欧阳荷根, 2013; 张万益等, 2013)。矿床由百余个矿(化)体组成, 矿石工业类型可分为: 铜多金属矿石和锌矿石两种(李蒙文, 2006)。

维拉斯托矿区北侧(以下简称研究区)深部是否存在隐伏矿体及其赋存位置, 是当前需要解决的问题。前人通过野外地质调查、地球化学矿物元素分析和同位素研究, 确定研究区矿床是和早白垩世岩浆活动有关的岩浆热液脉型矿床(王长明等, 2006; 郭灵俊等, 2011; 毛景文等, 2013)。由于区内地表为第四系覆盖, 用地表地质手段不易实现对成矿热液运移通道和深部断裂构造空间展布情况进行研究(熊小松等, 2011; 欧阳荷根, 2013; Yang et al., 2016)。因此, 本文通过重力、磁法和电法, 结合地质资料, 对区内深部构造展布情况进行研究, 厘定区内深部构造及其与隐伏矿体的关系, 推测出热液运移的通道, 进而对研究区覆盖层下的隐伏矿进行定位预测。

1 成矿地质特征

1.1 区域地质背景

大兴安岭南段西坡褶皱断裂构造发育, 断裂以 NE 向挤压断裂构造带为主, 控制着区内岩浆岩的分布(李蒙文, 2006; Zhu et al., 2009; Guo et al., 2009; Zhang et al., 2010)。区内除广泛分布的第四系冲积层及风成砂土外, 主要出露下元古界宝音图组(锡

林郭勒杂岩)、上石炭系、二叠系、侏罗系地层。由老至新为: ①下元古界宝音图组(Pt_1by); ②上古生界石炭系(区内零星出露上石炭统本巴图组(C_2b)及阿木山组(C_2a)); ③上古生界二叠系(区内大面积出露, 呈长条状分布于矿区外围南东部, 分为下二叠统大石寨组(P_1d)及上二叠统林西组(P_2l)); ④中生界侏罗系; ⑤第四系(Qh)(刘志宏等, 2008)。

大兴安岭成矿带南段的岩浆岩主要为海西期和燕山期两期侵入, 受北东断裂控制, 呈岩株状、岩基状分布, 其它地质时期(诸如加里东期和兴凯期)较为少见(毛景文等, 2005)。

大兴安岭南段在早白垩世时期整体为伸展环境(Wu et al., 2002; Meng, 2003; 毛景文等, 2005; 邵济安等, 2005; Wang F et al., 2006; Zhang et al., 2008; Wang T et al., 2012; 欧阳荷根, 2013), 深源物质的底侵导致地壳出现 S-型花岗岩类岩浆→上侵形成伟晶岩型矿床(Robb, 2004; 欧阳荷根, 2013)→形成云英岩型锡矿和中-低温热液脉型锡矿等(欧阳荷根, 2013)→形成矽卡岩(形成矽卡岩型锡铁矿床 I-型花

岗岩类岩浆)→形成斑岩型矿床(大兴安岭东坡地壳的较浅部位)→形成岩浆热液脉型矿床(箭头表示岩浆向上运移。大兴安岭南段的西坡和主脊地区地壳较深部位演化出富含多金属的成矿溶液, 最终在断裂交汇部位卸载富集成矿, 如维拉斯托铜多金属矿床等)。

1.2 矿区地质特征

维拉斯托矿区多为第四系所覆盖, 仅见少量宝音图组黑云斜长片麻岩出露(图 2)(李蒙文, 2006)。与成矿相关的构造主要有 NW 及 NEE 向断裂(图 2)(欧阳荷根, 2013), 其中: NW 向断裂(助力可河断裂)断层面多现构造破碎角砾, 属隐伏张裂断层, 从矿区西南通过, 是含矿热液运移通道; NEE 向断裂呈“S”状压扭性断裂, 规模沿走向及倾向都存在变化, 断裂破碎带宽度变化较大, 断裂面北倾, 倾角大约 30° , 是区内主要的控矿构造(图 2a), NW 和 NEE 向断裂交汇处控制了矿体赋存。研究区成矿模式图见图 3。矿区内变质作用有区域变质、动力变质及热液变质作用三类。区内脉岩不发育, 主要脉岩为分布于黑云斜长片麻岩中的海西期脉岩, 脉岩物性见表 1。

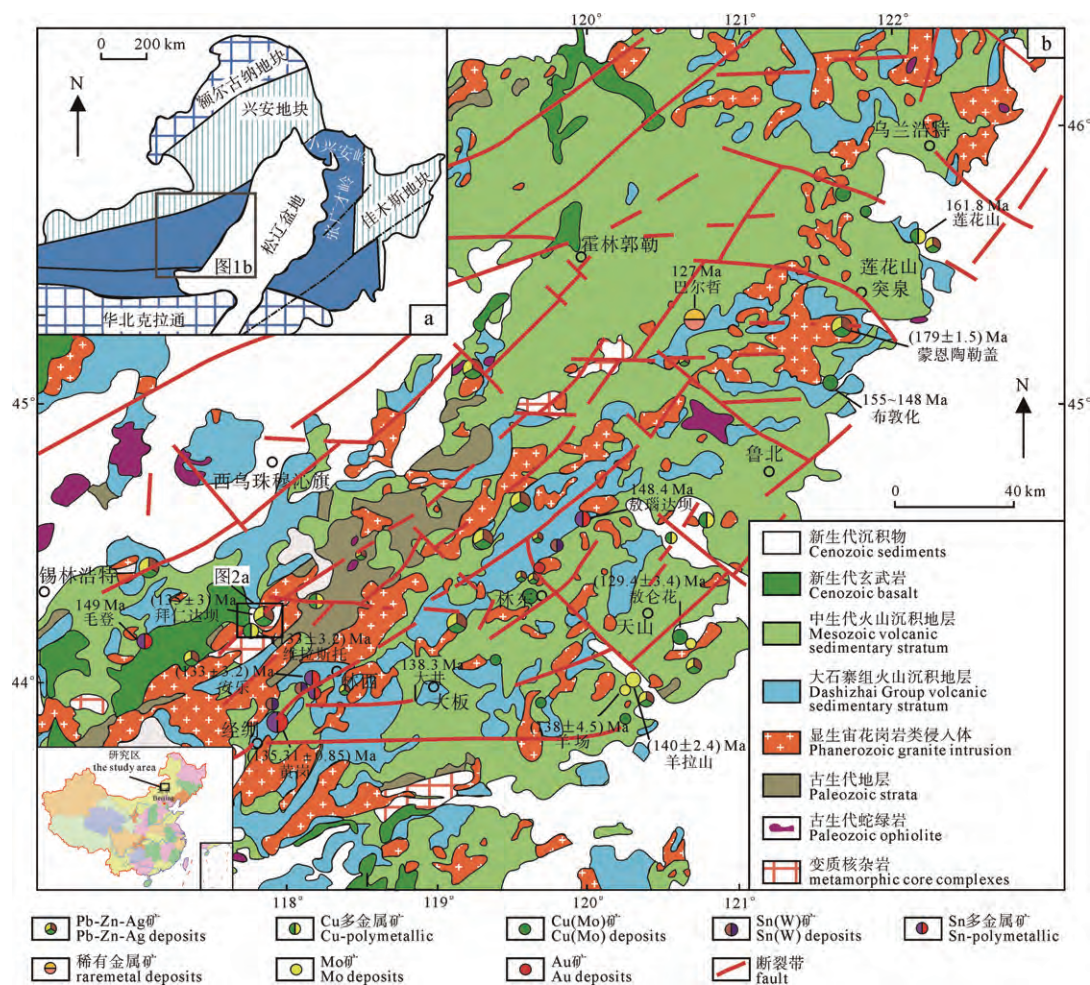


图 1 中国东北及其邻区区域构造简图(a, 据刘建明等, 2004 和 Zhang et al., 2010 修编)和大兴安岭南段区域构造-岩浆及矿产地质简图(b, 据李蒙文, 2006; Guo et al., 2009; 欧阳荷根, 2013 修改)

Fig. 1 Simplified regional tectonic map of Northeast China and adjacent areas (a, modified after LIU et al., 2004; Zhang et al., 2010), and simplified geological map of southern Da Hinggan Mountains showing regional tectonics, magmas and mineral resources (b, modified after LI, 2006; Guo et al., 2009; OUYANG, 2013)

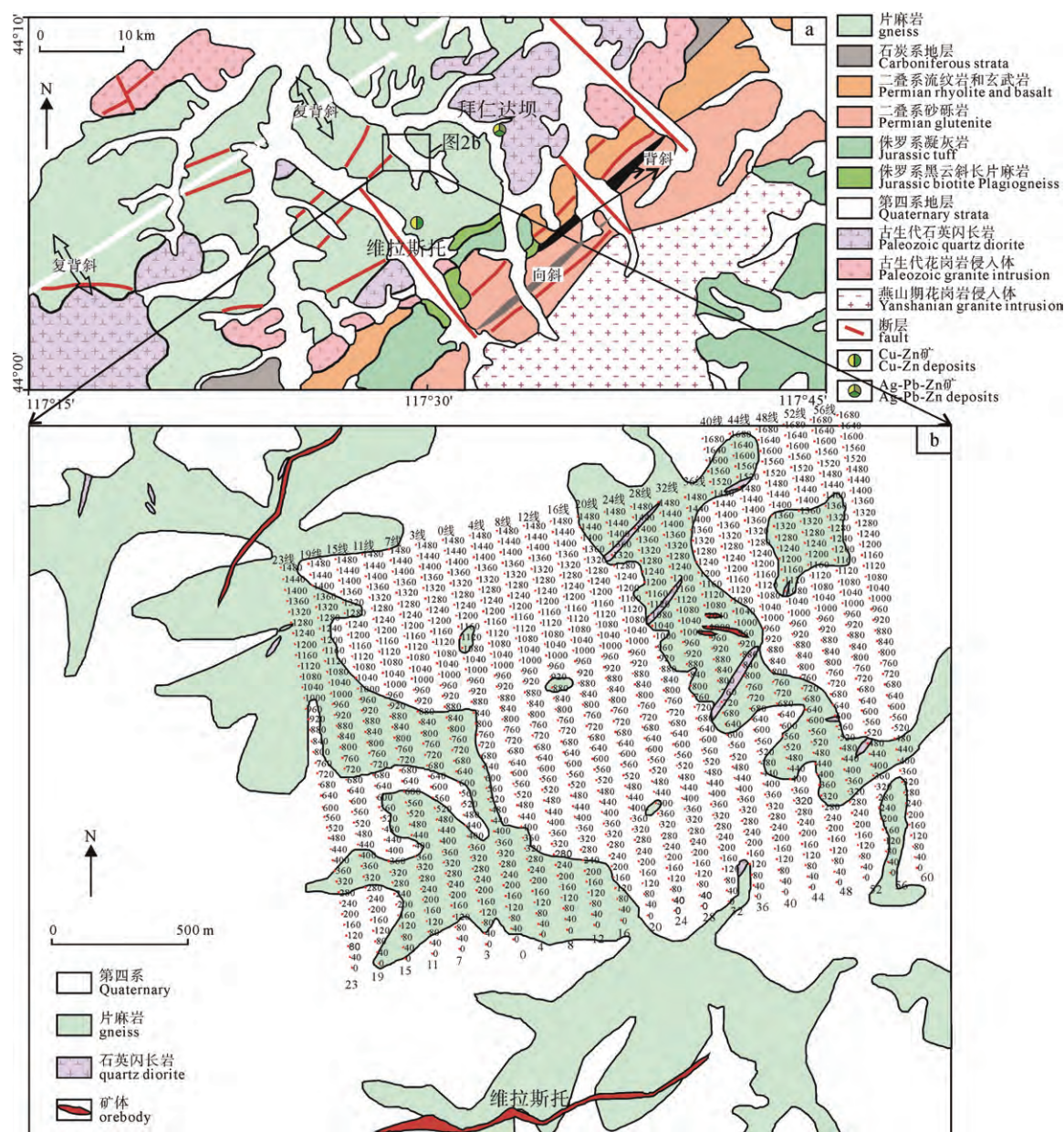


图2 维拉斯托矿床矿区地质简图(据欧阳荷根, 2013 修改)和测线布设
Fig. 2 Simplified geological map of the Weilasituo deposit showing the distribution of major fault zones (modified after OUYANG, 2013) and the survey lines

矿床由百余个大小各异的矿(化)体组成, 主要赋矿围岩为黑云斜长片麻岩(欧阳荷根, 2013)。这些矿(化)体由于受控于断裂构造其走向多呈成近东西向。矿床的围岩蚀变强烈, 各成矿阶段的围岩蚀变呈现一定差异。前阶段和主阶段以绿泥石化、硅化和伊利石化为主, 晚阶段为方解石化和绿泥石化为主。矿石主要为硫化物矿石, 组成矿物包括毒砂、磁黄铁矿、黄铜矿和方铅矿等金属矿物以及石英、方解石等脉石矿物。

2 综合地球物理探测

2.1 物性分析

据 MOLSPIN(英国)磁测系统和 RP-1 型电性测量仪对岩石、矿石物性的测试结果(表 1): 围岩(充电

率较低, 在 1.21~2.26 ms, 电阻率值较高($\geq 4\ 000\ \Omega\cdot m$,

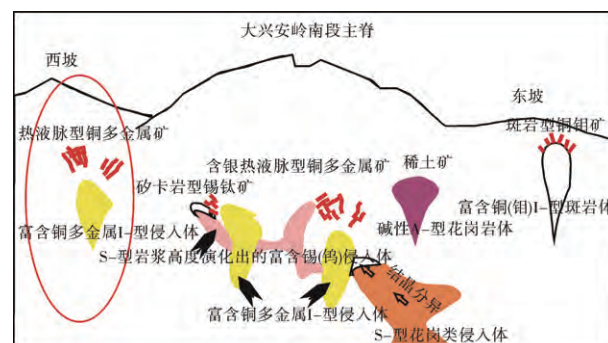


图3 大兴安岭成矿带成矿模式图
(据欧阳荷根, 2013 修改)(红色圈为本区成矿模式)
Fig. 3 Metallogenic model of the Da Hinggan Mountains metallogenic belt (modified after OUYANG, 2013) (Red circle shows the local metallogenic model)

表 1 维拉斯托矿区铜多金属矿岩(矿)石物性参数统计表
Table 1 Statistical table of the copper polymetallic ores physical properties at Weilasituo

岩矿石名称	块数	密度/(g/cm ³)			磁化率/(10 ⁻⁶ SI)			剩磁强度/(10 ⁻³ A/m)		
		范围	平均值		范围	平均值		范围	平均值	
闪长岩	31	2.544	2.854	2.655	7.4	9 025.9	664.5	0.1	3 576.5	153.0
片麻岩	35	2.618	2.890	2.712	25.1	10 222.7	658.1	0.1	4 314.8	157.3
基性脉岩(矿化)	4	3.000	4.514	3.500	629.2	178 041.1	46 599.8	13.8	9 448.0	3 386.7
闪长岩(矿化)	4	2.874	4.650	3.728	54.2	15 624.3	4 076.3	0.3	3 586.3	902.5
闪锌矿	8	3.260	4.871	4.289	4 692.4	327 656.5	58 987.0	212.7	23 488.8	8 858.2
铜锌矿	6	3.699	4.381	3.992	4 008.3	27 642.1	10 874.1	22.8	2 988.1	1 112.9
黄铜矿	1			4.227			39 632.9			15 206.8
矿体	3	2.951	4.124	3.670	15 896.4	374 226.3	135 800.0	356.5	47 985.2	17 021.3

岩矿石名称	块数	电阻率/(Ω·M)			充电率/ms		
		范围	平均值		范围	平均值	
闪长岩	31	925.3	5 205.7	4 832.4	0.1	1.2	0.4
片麻岩	35	198.3	7 180.0	2 690.1	0.1	54.0	2.7
基性脉岩(矿化)	4	53.5	2 174.6	773.3	0.3	84.9	52.1
闪长岩(矿化)	4	54.9	257.3	147.4	6.7	79.7	56.0
闪锌矿	8	42.0	185.5	90.3	26.6	94.4	71.6
铜锌矿	6	18.8	61.2	41.4	70.7	89.8	80.8
黄铜矿	1			40.8			90.5
矿体	3						

最高达 35 206 Ω·m), 其密度较低 < 2.9 g/cm³); 氧化矿石(充电率亦偏低, 地表取样测定≤3 ms, 电阻率值较高, 多在 3 000 Ω·m 左右); 硫化物岩石(表现为高密度, > 3.9 g/cm³, 呈明显高充电率、低电阻率特性, 充电率≥15 ms, 最高可达 57 ms, 电阻率≤1 000 Ω·m, 最低仅几十 Ω·m), 是矿区内高充电率、低电阻率物性异常的主要地质诱因(王清义等, 2012)。

基于上述成矿模式、矿区控矿条件分析和系统的岩/矿石物性特征测试结果, 确定通过对区内重力场、磁场和电场的研究, 圈定与矿有关的物性异常区域, 推测构造和岩体, 厘定区内构造、岩体和矿体的关系, 进而选定详查靶区, 最终达到定位预测区内隐伏矿体的目的(图 4), 测区岩体分布和地球物理测线敷设图见图 2。

2.2 综合地球物理工作成果的分析与推断

依据上文地质分析, 提出解决区内第四系覆盖区找矿问题的九字口诀方法, 即: 找断裂, 圈岩体, 定矿体。因此, 本文采用综合地球物理方法进行研究, 即: 重力预测构造, 磁法、激电预测岩体和矿化, 可控源音频大地电磁法(以下简称 CSAMT)定位预测矿体位置(覆盖区隐伏矿体综合地球物理勘查流程图见图 4)。

2.2.1 重力异常分析与推断

采用 CG-5 型重力仪采集重力场数据。依据地质情况可知区内矿体展布受线性构造控制, 为了较好反映线性地质构造, 计算测区重力异常 0°方向导数(图 5)。

断裂破碎带密度的方向导数较围岩高, 依据表 1, 由重力异常方向导数的串珠状高值异常, 推测研究区内存在“两个走向共三条”方向导数高值异常带, 推测为断裂构造, 且均符合研究区已知的成矿模式(图 3)和控矿构造特征, 三条断裂构造的几何参数如下: NW 向 30°断裂 F₂, F₃, NEE 向物性断裂 F₁。F₂ 横跨 23、19、15、11、7、3、0、4 和 8 线; F₃ 范围 16、20、24、28、32、36、40、44、48、52、56 和 52 线; F₁ 断裂沿着 NE60°方向贯穿区内所有测线。依据本文第一节的研究区地质特征, 圈

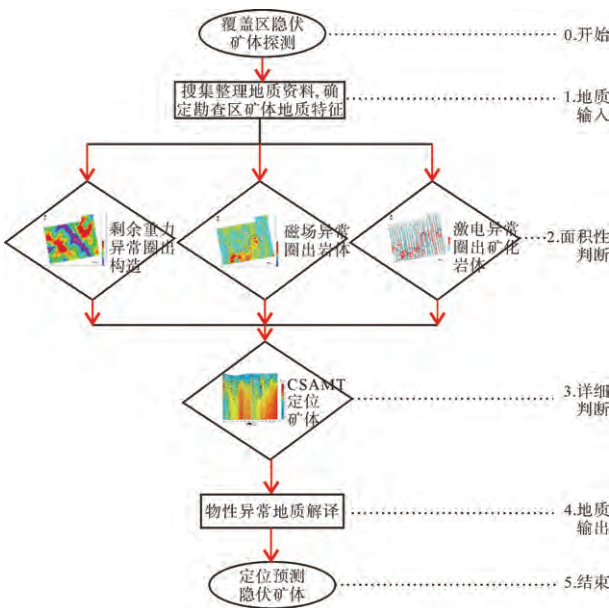


图 4 覆盖区隐伏矿体综合地球物理勘查流程图
Fig. 4 An integrated geophysical prospecting model for concealed orebody in coverage area

定 F_1 和 F_2 交汇处, F_1 和 F_3 交汇处为详查靶区。

下文使用磁法、激电和 CSAMT 对断裂交汇部位的地球物理属性进行精细探测研究(图 4), 揭露第四系覆盖的断裂交汇部位物性特征, 进而定位预测隐伏矿体。

2.2.2 磁场异常分析与推断

本文高精度磁场数据采集使用 GSM-19T 质子旋进磁力仪。

高精度磁场数据作化磁极(图 6a)及 200 m 上延处理(图 6b)。在测区中有两个相接高值磁异常区域形成“月牙状”, NE-SW 走向延伸约 1 300 m, 直至出测区, 其间分布多个局部磁异常。

将依据重力异常方向导数研究推测出的“两个走向三条断裂”(F₁、F₂ 和 F₃)投在测区磁场图件中(图 6), 发现多个局部高磁异常全部落在断裂交汇部位周围。依据表 1 矿体/矿化物性特征表现为高磁, 推断高磁异常为矿/矿化体集中分布区域。对磁场作上延 200 m 处理后(图 6b), 磁场高值异常区域位置和走向轮廓保持不变, 异常区域相互融合, 但断裂交汇部位磁异常衰减较慢, 表明引起磁异常高值的磁性地质体埋藏较深且规模较大, 这也预示该处存在深部隐伏矿体。参照研究区地质情况, 推测“月牙状”磁异常对应两处含矿/矿化岩体。

2.2.3 激电异常分析与推断

用 GDP-32^{II} 采集激电(采用中梯装置)和 CSAMT 数据。由激电中梯视充电率平面等值线图(图 7a), 研究区存在 M1 和 M2 两个视充电率高值异常。其中, M1 含四个局部异常(图中绿色虚线圈定): M1-1(3、0、4 线 280 点)、M1-2(12、16、20 线 350 点)、M1-3(28、32、36、40 线 980 点)和 M1-4(52、56、60 线 900 点)。激电中梯视电阻率平面等值线

图(图 7b)中的视电阻率分布大致以 28 线为界分为东、西两部分。

重力和磁法研究成果(两个走向三条断裂; 两处岩体)投在激电中梯视充电率和视电阻率平面等值线图后(图 7), 发现两处断裂交汇部位分别对应视充电率高值异常, 即: F_1 和 F_2 交汇部位对应(M1-1、M1-2), F_1 和 F_3 交汇部位对应(M1-3)(图 7a); 同时, 两处断裂交汇位置的视电阻率为相对低值(图 7b)。由此推测(M1-1、M1-2)、(M1-3)两处视电阻率低值、视充电率高值为矿化岩体。依据表 1 测区岩矿石物性参数统计, 表格从上到下(即围岩→矿体), 物性由高阻低充电→低阻高充电。推断断裂交汇部位存在矿体。

综上所述, 磁法圈定的岩体和激电圈定的矿化研究成果均印证了由重力异常方向导数圈定的断裂

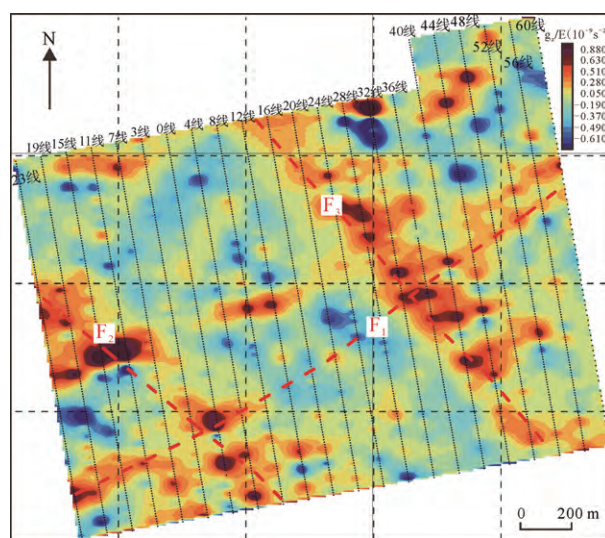


图 5 重力异常方向导数平面图(红色虚线为推断断层)
Fig. 5 Directional derivative contour map of gravity anomaly (the red dotted lines show inferred faults)

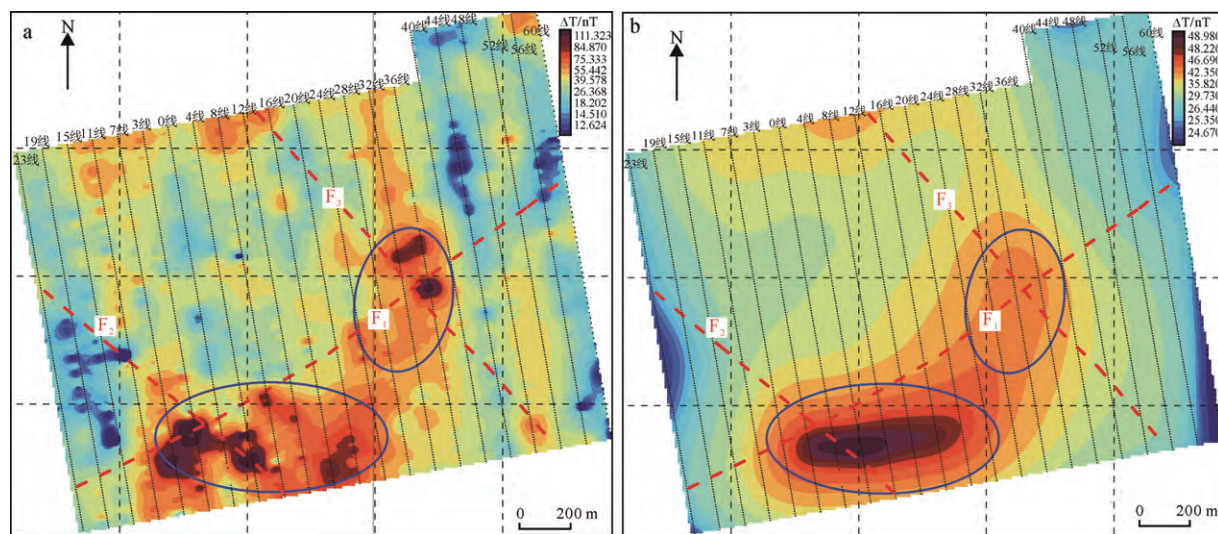


图 6 磁场化极后(a)和上延 200 m 后(b)的平面等值线图(蓝色椭圆圈定磁异常)
Fig. 6 Contour map of the magnetic field reduced to the pole (a) 200 m up extension (b) from the reduced to pole magnetic field (The blue ovals show magnetic anomalies)

构造。结合区域成矿模式(图 3), 推断“两个方向三条断裂” F_1 、 F_2 和 F_3 是区内的重要控矿断裂, 严格控制了区内矿体的分布, 提出断裂交汇处是覆盖区隐伏矿体赋存的有利部位。

2.2.4 可控源音频大地电磁异常分析与推断

根据重力、磁法和激电中梯研究成果, 在异常印证较好的 0 线、36 线和 44 线和 48 线开展 CSAMT 探测研究。本文以地质矿产信息较好, 同时穿过 F_1 、 F_2 的 0 线、穿过 F_1 、 F_3 的 36 线为例, 综合分析和研究测区构造和深部隐伏矿体关系。

图 8 为 0 线综合地球物理探测图。由 CSAMT

反演电阻率断面图, -880 至 500 点标高 700 m 以浅为大范围相对低阻, 深部存在高阻, 其中在 -700、-450、-350、50、300 五处存在浅部次高阻团, 推测为老地层残留。反演电阻率等值线分布形态总体向北倾。中梯激电在 100 至 400 点视充电率呈现高值异常, 相应视电阻率为低阻异常, 磁法为高值异常; 600 至 800 点视充电率呈现波浪式高值异常, 对应视电阻率为波浪式低阻异常, 磁法为次高值异常(图 8a 中红色方框内部分)。图中 -700 至 0 点有 8 眼已知钻孔, 控制的矿体为测区 1 号矿脉, 其总体倾向北, 倾角 30° 左右。综上, 同时依据表 1 中矿石电

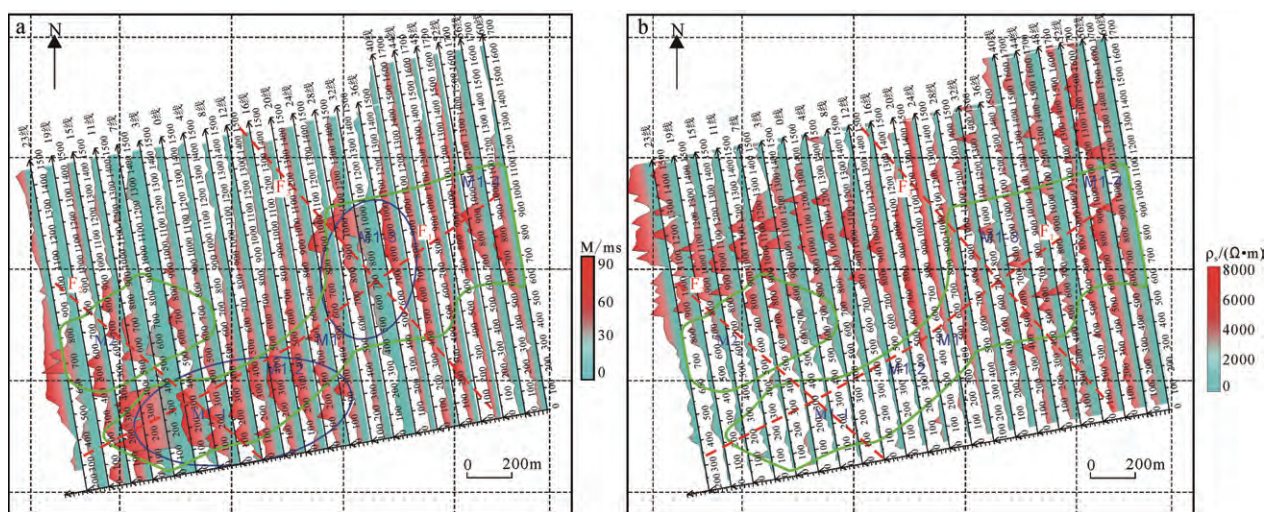


图 7 激电中梯视充电率(a)、视电阻率(b)平面图(绿色虚线: 视充电率异常区域)

Fig. 7 The contour map of IP apparent polarizability(a) and IP apparent resistivity(b) (The green dotted zones show charging rate anomalies)

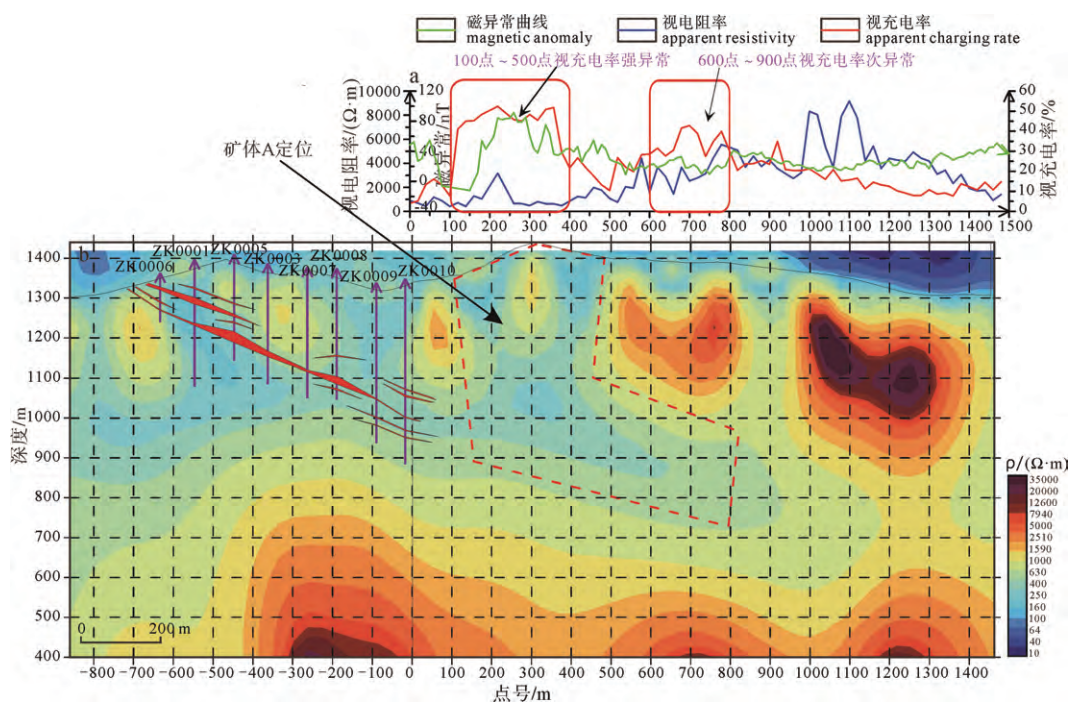


图 8 0 线综合地球物理分析图

Fig. 8 Comprehensive cross section of resistivity from inversion of CSAMT on Line No. 0

a-激电剖面; b-CSAMT 反演电阻率

a-IP section; b-inversion resistivity profile of CSAMT

阻率为低值, 预测 0 线 100 至 900 点, 标高最深达到 600 m (见图 9d 中红色虚线框范围 A) 存在矿体, 其倾向亦推测为北。同时, 推测 0 线深部高阻异常区域为侵入岩体, 深部含矿热液沿裂隙向上运移, 至浅部断裂交汇部位形成矿体, 矿体埋深可能延伸到标高 600 m。其中 0 线 250 点和 350 点分别对应依据重力方法推断的 F_2 和 F_1 断裂。

36 线综合地球物理分析图(图 9)中, a 是激电异常曲线、b 是磁法实测数据和拟合曲线、c 是磁法剖

面反演图、d 为 CSAMT 一维反演电阻率断面图。其中磁法剖面反演方式, 其曲线拟合均方误差为 0.16 nT。

在测点 310~520 点(图 9d 中红色虚线框 B 区域)附近反演电阻率值较低, 重力异常方向导数高值(图 5), 激电视充电率低值(图 7 左和图 9a), 视电阻率相对低值(图 7 右和图 9a), 磁异常物性反演高值(图 9c), 根据表 1 岩矿石物性特征, 推测为断裂 F_3 引起, 该断裂有向下延伸趋势, 且深度可能较大。

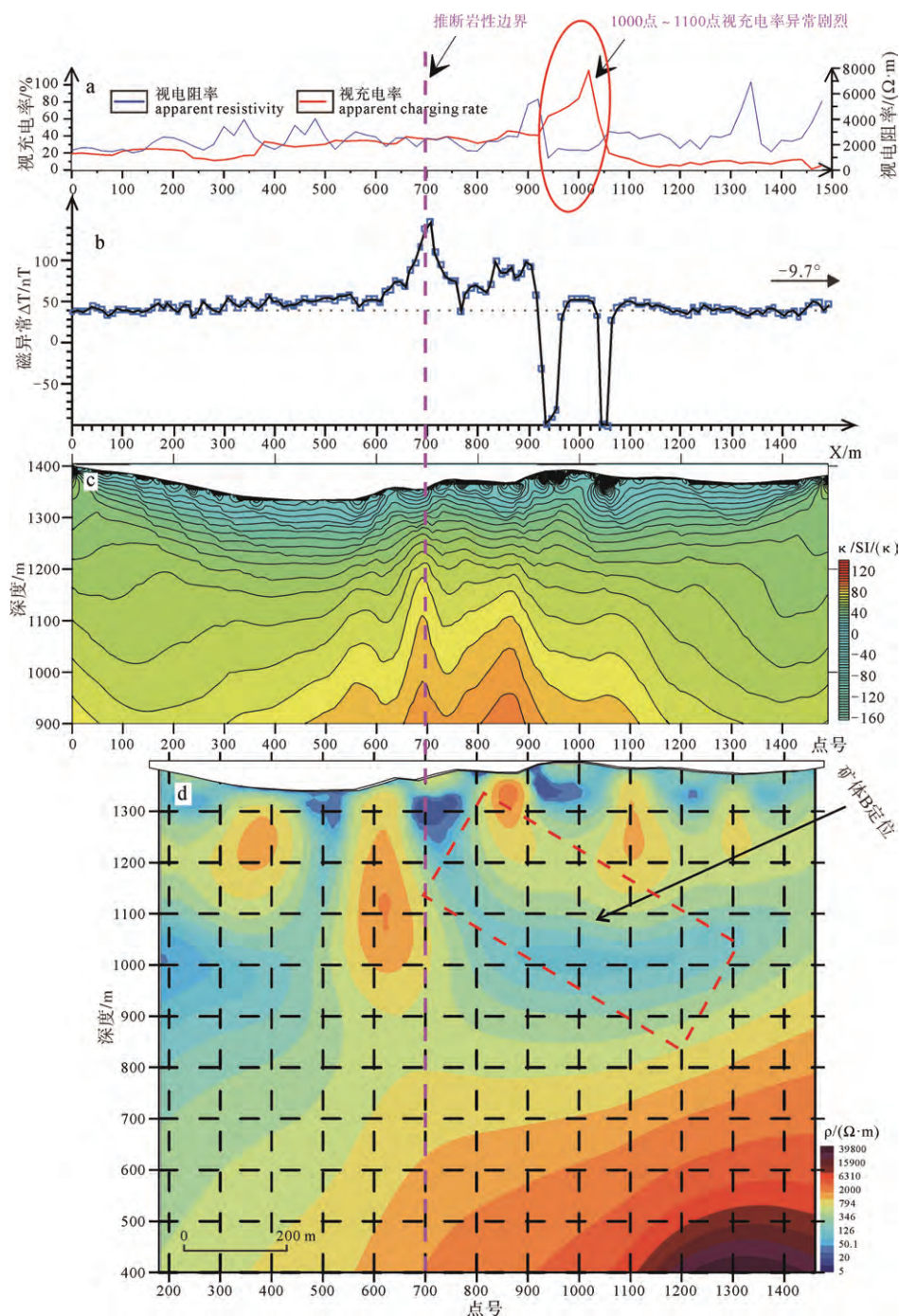


图 9 36 线综合地球物理分析图

Fig. 9 Comprehensive cross section of resistivity from inversion of CSAMT on Line No. 36

a-激电剖面; b-磁异常拟合曲线; c-磁异常物性反演; d-CSAMT 反演电阻率

a-IP section; b-the fitting curve of magnetic abnormal; c-the physical property inversion of magnetic anomaly; d-the inversion resistivity profile of CSAMT

测点 700 至 1 300 点标高 800 m(图 9d 中红色虚线框 B 区域)附近反演电阻率低阻, 重力异常方向导数高值(图 5), 激电中梯视充电率高值(图 7a 和图 9a), 视电阻率跳动低值(图 7b 和图 9a), 磁异常物性反演低值(图 9c), 推测为 F_1 引起。

依据测区重力、磁法、激电中梯和 0 线综合研究成果, 在 36 线定位预测一处矿体: 矿体 B, 标高范围(海拔)1 350 至 970 m, 测点范围: 700 至 1 300 点, 倾向 N, 倾角 30° 左右。同时, 推测 500 点处的 F_3 断裂是深大断裂, 为含矿热液向上运移提供通道。至此, 综合地球物理方法验证了研究区主矿体赋存在断裂交汇部位的地质论点。

3 讨论与结论

在燕山晚期(140—120 Ma)大兴安岭成矿带南段西坡岩浆热液成矿活动剧烈, 大量深部含矿热液流体经深大断裂为向上运移, 上升至断裂交汇处卸载, 形成了类似维拉斯托矿区的典型铜多金属矿床集中分布区。通过对区内地球物理场综合分析研究, 得出以下认识:

结合研究区已有地质矿产信息, 本文综合重力、磁法、激电中梯和 CSAMT 等地球物理探测研究成果, 对研究区内覆盖区隐伏构造及矿体的地质、地球物理特征进行了剖析, 认为燕山期含矿岩浆混合热液流体沿 NW 向深大断裂向上运移, 至海西期石英闪长岩和下元古界片麻岩中的 NE 向断裂交汇部位, 含矿热液流体中的成矿物质发生卸载并富集成矿。研究区矿床严格受断裂构造控制, 其中 NW 向断裂属深大断裂, 为主要导矿构造, 而 NEE 向断裂与 NW 向断裂交汇部位是矿体主要赋存空间, 推测断裂交汇处深部可能存在更大规模的隐伏矿体。

依据覆盖区隐伏矿体综合地球物理勘查流程(图 4), 本文通过面积性测量(重力、磁法和激电等地球物理探测)圈出了区内控矿断裂构造和岩体矿化, 厘定了构造、岩体以及构造与矿体赋存关系, 进而确定了开展进一步工作的精细测量区域, 进而利用 CSAMT 方法定位预测了研究区内的矿脉的埋深, 共预测两处隐伏矿体。本文构建的覆盖区隐伏矿体综合地球物理勘查流程能够满足覆盖区的找矿需求, 具有推广价值。

致谢: 感谢本文在野外数据采集过程中内蒙古银都矿业有限公司拜仁达坝矿业有限公司和维拉斯托矿业有限公司的工程师们给予的支持与帮助。在成文过程中中国地质大学(北京)王中亮讲师、邱昆峰博士后和张良、李瑞红博士给予了指导和帮助, 在此一并表示衷心感谢。在文章的评审过程中, 匿名外

审专家的意见非常有建设性, 提高了论文的质量, 在此表示感谢。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41504063), National Key Scientific Instrument and Equipment Development Project (No. B02011YQ05006011), “Project 111” (No. B07011), and China Geological Survey (Nos. 1212011120202, 121201108000150003-02).

参考文献:

- 成秋明. 2012. 覆盖区矿产综合预测思路与方法[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 37(6): 1109-1125.
- 郭灵俊, 赵志军, 崔来旺, 杨波, 连世恩. 2011. 内蒙古阿巴嘎旗北部铜多金属矿地质矿产特征及找矿方向[J]. 地球学报, 32(1): 57-63.
- 李蒙文. 2006. 天山-兴蒙造山带中段内生金属矿床成矿系列及成矿预测[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 刘建明, 张锐, 张庆洲. 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征[J]. 地学前缘, 11(1): 269-277.
- 刘志宏, 朱德丰, 吴相梅, 杨建国, 林东成, 李晓海. 2008. 东北地区拉布达林盆地的构造特征及早白垩世变形序列[J]. 地球学报, 29(4): 427-433.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 21(1): 168-188.
- 毛景文, 周振华, 武广, 江思宏, 刘成林, 李厚民, 欧阳荷根, 刘军. 2013. 内蒙古及邻区矿床成矿规律与成矿系列[J]. 矿床地质, 32(4): 716-730.
- 欧阳荷根. 2013. 大兴安岭南段拜仁达坝-维拉斯托银多金属矿床成矿作用及动力学背景[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 戚志鹏, 李貅, 钱建兵, 楚岩, 张旭. 2012. 电法联合解释在覆盖区矿产勘查中的应用[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 37(6): 1199-1208.
- 邵济安, 刘福田, 陈辉, 韩庆军. 2001. 大兴安岭—燕山晚中生代岩浆活动与俯冲作用关系[J]. 地质学报, 75(1): 56-63.
- 史建民, 林泽付, 胡鑫. 2014. 大兴安岭地区航磁异常特征与地质构造、成矿带的关系探讨[J]. 地球物理学进展, 29(1): 110-115.
- 孙爱群, 牛树银, 马宝军, 聂凤军, 江思宏, 张建珍, 王宝德, 陈超. 2011. 内蒙古拜仁达坝与维拉斯托银多金属矿床成矿构造对比[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(6): 1784-1793.
- 王清义, 张金祥, 张廷. 2012. 内蒙古维拉斯托锌铜多金属矿找矿模型[J]. 西部资源, (5): 110-112.
- 王长明, 张寿庭, 邓军. 2006. 大兴安岭南段铜多金属矿成矿时空结构[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 33(05):

478-484.

- 熊小松, 高锐, 张兴洲, 李秋生, 侯贺晟. 2011. 深地震探测揭示的华北及东北地区莫霍面深度[J]. 地球学报, 32(01): 46-56.
- 徐启东, 张晓军, 尚恒胜, 杨振, 左仁广, 姚春亮, 刘锐. 2012. 构建覆盖区综合地质找矿思路和流程的探索: 以内蒙古锡林郭勒西北部为例[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 37(6): 1252-1258.
- 杨岳清, 侯增谦, 黄典豪, 曲晓明. 2002. 中甸弧碰撞造山作用和岩浆成矿系统[J]. 地球学报, 23(1): 17-24.
- 张万益, 聂凤军, 刘树文, 左力艳, 陕亮, 姚晓峰. 2013. 大兴安岭南段西坡金属矿床特征及成矿规律[J]. 中国地质, 40(5): 1583-1599.

References:

- CHENG Qiu-ming. 2012. Ideas and Methods for Mineral Resources Integrated Prediction in Covered Areas[J]. Earth Science-Journal of China of China University of Geosciences, 37(1): 1109-1125(in Chinese with English abstract).
- GUO F, FAN W, LI C, GAO X, MIAO L. 2009. Early Cretaceous highly positive Nd felsic volcanic rocks from the Hinggan Mountains, NE China: origin and implications for Phanerozoic crustal growth[J]. International Journal of Earth Sciences, 98(6): 1395-1411.
- GUO Ling-jun, ZHAO Zhi-jun, CUI Lai-wang, YANG Bo, LIAN Shi-en. 2011. Geological and Mineral Resource Characteristics and Oreprospect of Cu-polymetallic Deposits in the Northern Part of Abag Banner, Inner Mongolia[J]. Acta Geoscientica Sinica, 32(1): 57-63(in Chinese with English abstract).
- LI L, SANTOSH M, LI S. 2015. The 'Jiaodong type' gold deposits: Characteristics, origin and prospecting[J]. Ore Geology Reviews, 65: 589-611.
- LI Meng-wen. 2006. Research on Metallogenic Series and Prognosis of Endogenetic Metallic Deposits in the Middle Section of Tianshan-Xingmeng Orogen[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- LIU Jian-meng, ZHANG Rui, ZHANG Qing-zhou. 2004. The regional metallogeny of Da HingganLing, China[J]. Earth Science Frontiers, 11(1): 269-277(in Chinese with English abstract).
- LIU Zhi-hong, ZHU De-feng, WU Xiang-mei, YANG Jian-guo, LIN Dong-cheng, LI Xiao-hai. 2008. Structural Features and Lower Cretaceous Deformation Sequence of Labudalin Basin in Northeast China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 29(4): 427-433(in Chinese with English abstract).
- MAO Jing-wen, ZHOU Zhen-hua, WU Guang, JIANG Si-hong, LIU Cheng-lin, LI Hou-min, OUYANG He-gen, LIU Jun. 2013. Metallogenic regularity and minerogenetic series of ore deposits in Inner Mongolia and adjacent areas[J]. Mineral Deposits, 32(4): 716-730(in Chinese with English abstract).
- MAO Jing-wen, XIE Gui-qing, ZHANG Zuo-heng, LI Xiao-feng, WANG Yi-tian, ZHANG Chang-qing, LI Yong-feng. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. Acta Petrologica Sinica, 21(1): 169-188(in Chinese with English abstract).
- MENG Q R. 2003. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract?[J]. Tectonophysics, 369(3-4): 155-174.
- OUYANG He-gen. 2013. Metallogenesis of Bairendaba-Weilasituo silver polytmetallic deposit and its geodynamic setting, in the southern segment of Great Xing'an Range, NE China[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- QI Zhi-peng, LI Xiu, QIAN Jian-bing, CHU Yan, ZHANG Xu. 2012. Application of Electrical Joint Interpretation Method in Mineral Exploration of Coverage Areas[J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences, 37(6): 1199-1208(in Chinese with English abstract).
- ROBB L. 2004. Introduction to ore-forming processes[M]. Malden: Wiley-Blackwell.
- SHAO Ji-an, LIU Fu-tian, CHEN Hui, HAN Qing-jun. 2001. Relationship between Mesozoic Magmatism and Subduction in Da Hinggan-Yanshan Area[J]. Acta Geologica Sinica, 75(1): 56-63(in Chinese with English abstract).
- SHI Jian-min, LIN Ze-fu, HU Xin. 2014. Discussion about the connection among aeromagnetic anomaly characteristics, geological structure and metallogenic belt in Daxinganling area[J]. Progress in Geophysics, 29(1): 110-115(in Chinese with English abstract).
- SUN Ai-qun, NIU Shu-yin, MA Bao-jun, NIE Feng-jun, JIANG Si-hong, ZHANG Jian-zhen, WANG Jian-zhen, WANG Bao-de, CHEN Chao. 2011. A Comparative Study of Ore-Forming Structures in Bairendaba and Weilasituo Silver-Polymetallic Deposits of Inner Mongolia[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 41(6): 1784-1793(in Chinese with English abstract).
- WANG F, ZHOU X H, ZHANG L C, YING J F, ZHANG Y T, WU F Y, ZHU R X. 2006. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing'an Range (NE China): Timing and implications for the dynamic setting of NE Asia[J]. Earth and Planetary Science Letters, 251(1): 179-198.
- WANG T, GUO L ZHENG Y D, DONSKAYA T, GLADKOCHUB

- D, ZENG L S, LI J B, WANG Y B, MAZUKABZOV A. 2012. Timing and processes of late Mesozoic mid-lower-crustal extension in continental NE Asia and implications for the tectonic setting of the destruction of the North China Craton: Mainly constrained by zircon U-Pb ages from metamorphic core complexes[J]. *Lithos*, 154: 315-345.
- WANG Chang-ming, ZHANG Shou-ting, DENG Jun. 2006. The metallogenic space-time structure of copper-polymetallic deposits in the southern segment of Da-Hinggan Mountains, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 33(5): 478-484(in Chinese with English abstract).
- WANG Qing-yi, ZHANG Jin-xiang, ZHANG ting. 2012. Ore-Prospecting Model of Weilasituo Zinc-copper Polymetallic Deposit[J]. *Western Resources*, (5): 110-112(in Chinese with English abstract).
- WU F Y, SUN D Y, LI H M, JAHN B M, WILDE S. 2002. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. *Chemical Geology*, 187(1-2): 143-173.
- XIONG Xiao-song, GAO Rui, ZHANG Xing-zhou, LI Qiu-sheng, HOU He-sheng. 2011. The Moho Depth of North China and Northeast China Revealed by Seismic Detection[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(4): 427-433(in Chinese with English abstract).
- XU Qi-dong, ZHANG Xiao-jun, SHANG Heng-sheng, YANG Zhen, ZUO Ren-guang, YAO Chun-liang, LIU Rui. 2012. New Approach of Integrated Geological Prospection in Covered Areas: A Case Study from Northwestern Xinlingguole, Inner Mongolia[J]. *Earth Science Journal of China University of Geosciences*, 37(6): 1199-1208(in Chinese with English abstract).
- YANG L, BADAL J. 2013. Mirror symmetry of the crust in the oil/gas region of Shengli, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 78: 327-344.
- YANG L, DENG J, DILEK Y, QIU K F, JI X Z, LI N, TAYLOR R D, YU J Y. 2015a. Structure, geochronology, and petrogenesis of the Late Triassic Puziba granitoid dikes in the Mianlue suture zone, Qinling orogen, China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 127(11-12): 1831-1854.
- YANG L Q, DENG J, GUO L N, WANG Z L, LI X Z, LI J I. 2016. Origin and evolution of ore fluid, and gold-deposition processes at the giant Taishang gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 72: 585-602.
- YANG L Q, DENG J, QIU K T, JI X Z, SNTOSH M, SONG K R, SONG Y H, GENG J Z, ZHANG C, HUA B. 2015b. Magma mixing and crust-mantle interaction in the Triassic monzogranites of Bikou Terrane, central China: Constraints from petrology, geochemistry, and zircon U-Pb-Hf isotopic systematics[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 98: 320-341.
- YANG Yue-qing, HOU Zeng-qian, HUANG Dian-hao, QU Xiao-ming. 2002. Collision Orogenic Process and Magmatic Metallogenic System in Zhongdian Arc[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(04): 427-433(in Chinese with English abstract).
- ZHANG J H, GAO S, GE W C, WU F Y, YANG J H, WILDE S A LI M. 2010. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China: Implications for subduction-induced delamination[J]. *Chemical Geology*, 276(3-4): 144-165.
- ZHANG J H, GE W C, WU F Y, WILDE S A, YANG J H, LIU X M. 2008. Large-scale early cretaceous volcanic events in the northern Great Xing'an Range, northeastern China[J]. *Lithos*, 102(1-2): 138-157.
- ZHANG Wan-yi, NIE Feng-jun, LIU Shu-wen, ZUO Li-yan, SHAN Liang, YAO Xiao-feng. 2013. Characteristics and metallogenic regularities of ore deposits on the western slope of the southern section of the DA-Hinggan Mountains metallogenic belt[J]. *Geology in China*, 40(5): 1583-1599(in Chinese with English abstract).
- ZHAO D, MARUYAMA S, OMORI S. 2007. Mantle dynamics of Western Pacific and East Asia: Insight from seismic tomography and mineral physics[J]. *Gondwana Research*, 11(1-2): 120-131.
- ZHU R, ZHENG T. 2009. Destruction geodynamics of the North China craton and its Paleoproterozoic plate tectonics[J]. *Science Bulletin*, 54(19): 3354-3366.